J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 46, 2025. (101-117)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

Numerical study on seakeeping performance of a DTMB planing hull craft in regular sea waves

Mohsen Ghodrat[1], Amir H. Nikseresht[2*]

[1] *M.Sc., Mechanical Engineering Department, Shiraz University of Technology; ghodrat.m1988@gmail.com*
[2*] *Professor, Mechanical Engineering Department, Shiraz University of Technology; nikser@sutech.ac.ir*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 3 Mar 2025
Last modification: 9 Aug 2025
Accepted: 10 Aug 2025
Available online: 10 Aug 2025

Article type:
Research paper

Keywords:
Seakeeping
Regular waves
Planning craft
Response amplitude operator

Planing hull vessels have the potential to reach high speeds, which makes them particularly of great interest in marine studies. Seakeeping refers to the science of analyzing vessel motions in wavy seas and oceans and evaluating the impact of waves on various aspects related to the vessel. This study presents a numerical investigation into the seakeeping performance of a planing craft, with hull type DTMB 1-4667, under regular wave conditions, focusing on two degrees of freedom: heave and pitch motions. It is assumed that the fluid is incompressible and turbulent, and the effects of regular waves are modeled using a two-phase (air-water) flow approach. The analysis is conducted using ANSYS Fluent to solve the RANS equations, with the k-ω SST model employed for turbulence modeling and the Volume of Fluid (VOF) method used to track the free surface. Boundary conditions and mesh configurations are precisely defined, and grid sensitivity analysis and validation with experimental data are carried out, showing a maximum deviation of about 8% in drag force. Results indicate that increasing vessel speed and entering the planing regime leads to reduced response amplitude operators (RAOs) for heave and pitch, thereby improving seakeeping performance, although drag force and motion amplitudes increase moderately. Additionally, greater wave height and wavelength lead to increased motion amplitudes and slamming accelerations; however, the maximum recorded vertical acceleration in the worst-case scenario was 2.6g, which is below the acceptable limit of 4g for high-speed vessels. The main achievement of this study lies in the integration of precise numerical analysis, the comprehensive evaluation of various hydrodynamic parameters (including encounter frequency), and the detailed quantitative assessment of the vessel's dynamic response under different sea states—providing valuable insights for optimizing the hull design of high-speed vessels and enhancing their safety and onboard comfort.

ISSN: 2645-8136

DOI: http://dx.doi.org/10.61882/marineeng.21.46.9

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.9]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۶، ۱۴۰۴، (۱۱۷-۱۰۱)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

مطالعه عددی عملکرد دریامانی یک نوع بدنه شناور سرشی DTMB در امواج منظم

محسن قدرت[۱]، امیر حسین نیک سرشت[۲*]

[۱] دانشکد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، ghodrat.m1988@gmail.com

[۲] استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، nikser@sutech.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

کلمات کلیدی:

دریامانی

امواج منظم

شناور سرشی

عملگر پاسخ دامنه

شناورهای با بدنه سرشی قابلیت رسیدن به سرعت‌های بالایی را دارند و به همین دلیل در مطالعات دریایی بسیار مورد توجه هستند. دریامانی در واقع علم بررسی حرکات شناورها در دریاها و اقیانوس‌های مواج، و تاثیر امواج بر جنبه‌های مختلف وابسته به شناور می‌باشد. در این تحقیق به بررسی عددی عملکرد دریامانی یک شناور سرشی نوع DTMB 1-4667 در امواج منظم دریایی با تمرکز بر دو درجه آزادی حرکات هیو و پیچ پرداخته می شود. در این مطالعه، جریان تراکم‌ناپذیر و آشفته فرض شده است و اثرات امواج منظم با استفاده از مدل‌سازی دو فازی آب و هوا بررسی شده است. برای تحلیل ، از نرم‌افزار ANSYS Fluent جهت حل معادلات RANS استفاده شده است. در این تحلیل جهت مدل سازی جریان آشفته از مدل k-ω SSTاستفاده شده و سطح آزاد آب با روش حجم سیال ردیابی شده است. شرایط مرزی و شبکه‌بندی با دقت تنظیم شده و تحلیل حساسیت به شبکه و اعتبارسنجی نتایج با داده‌های آزمایشگاهی انجام شده است و تفاوت در نیروی پسا در بیشترین حالت حدود ۸٪ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش سرعت شناور و ورود آن به فاز سرشی منجر به کاهش عملگرهای پاسخ دامنه (RAO) حرکات هیو و پیچ و در نتیجه بهبود عملکرد دریامانی می‌شود، هرچند نیروی پسا و دامنه حرکات به‌طور نسبی افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد که افزایش ارتفاع و طول موج موجب افزایش دامنه حرکات و شتاب کوبشی می‌شود؛ با این حال، بیشینه شتاب عمودی در بدترین حالت برابر با ۲/۶ g ثبت شد که کمتر از حد مجاز ۴ g برای شناورهای پرسرعت است. دستاورد اصلی این پژوهش تلفیق تحلیل دقیق عددی، بررسی پارامترهای متنوع هیدرودینامیکی (از جمله فرکانس برخورد) و ارائه ارزیابی کمی دقیق از پاسخ دینامیکی شناور در شرایط مختلف دریایی است که می‌تواند در بهینه‌سازی طراحی بدنه شناورهای تندرو و افزایش ایمنی و راحتی آن‌ها نقش مؤثری ایفا کند.

DOI: http://dx.doi.org/10.61882/marineeng.21.46.9

ISSN: 2645-8136

حق نشر: © ۲۰۲۵ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY)ارسال شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.9]

۱ - مقدمه

دریامانی در واقع علم بررسی حرکات شناورها در دریاها و اقیانوس-های مواج، و تاثیر امواج بر جنبه‌های مختلف وابسته به شناور از جمله بدنه شناور، تجهیزات موجود در شناور به خصوص تجهیزات موجود در عرشه شناور، خدمه و مسافرین و همچنین تعیین محدوده عملکرد شناور برای انجام موفق و ایمن ماموریت آن از جمله حمل بار یا مسافر و یا مسائل نظامی می‌باشد. در حدود سال ۱۹۵۰، نیاز صنعت و تجارت دریایی به پیش‌بینی رفتار انواع شناورها و سازه‌های دریایی در دریاها به میزان قابل توجهی افزایش یافت. این نیاز زمینه جدیدی از تحقیقات در علوم دریایی با عنوان تحلیل عملکرد دریامانی یا تحلیل حرکات شناورها در آب مواج را ایجاد نمود [۱]. بدست آوردن اثرات ناشی از حرکت شناور در امواج بر بدن انسان و محموله شناورها و تلاش برای به حداقل رساندن این اثرات، مسلماً می‌تواند باعث افزایش قابلیت کاربری و همچنین ایمنی برای مسافران و محموله شناورها گردد [۲]. از جمله اثرات مستقیم امواج بر شناورها عبارتند از کاهش سرعت شناور، خیسی یا پر شدن عرشه از آب، پدیده کوبش روی سطح آب [۳]. در مطالعات دریایی مطمئن‌ترین روش استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و آزمایش آن می‌باشد که تنها خطای موجود در آن ناشی از اندازه‌گیری و روش آزمایش است. در مطالعات آزمایشگاهی و تجربی تهیه یک مدل الزامی می‌باشد. مدل باید در اندازه مناسبی از نمونه اصلی تهیه شود و به دلیل نیاز به دقت بالا در نتایج، رعایت تشابه هندسی، سینماتیکی و دینامیکی الزامی است. علاوه بر تهیه مدل، در اختیار داشتن محیط آزمایشگاهی با ابعاد و تجهیزات مناسب جهت انجام آزمایش نیز ضروری می باشد. از جمله این محیط‌ها می‌توان به حوضچه کشش و کانال آب اشاره کرد. با قرار دادن مدل در این محیط‌های آزمایشگاهی می‌توان شرایط مختلف دریایی را به صورت مصنوعی ایجاد کرد و با بررسی عملکرد مدل، نتایج حاصل را به نمونه اصلی تعمیم داد [۱]. لازم به ذکر است که مطالعات آزمایشگاهی و تجربی به دلیل پیش نیازهای فراوان ازجمله تهیه مدل، محیط آزمایشگاهی و تجهیزات لازم نسبت به سایر روش‌ها بسیار پرهزینه هستند.

مطالعه عددی به نسبت روش آزمایشگاهی نیازمند هزینه کمتری می‌باشد. با کمک دینامیک سیالات محاسباتی می‌توان به تحلیل مسائلی پرداخت که عملاً به صورت تحلیلی یا امکان‌پذیر نیستند و یا بسیار پیچیده و دشوار می‌باشند. توسعه سیستم‌های رایانه‌ای اثر شگرفی بر علوم به خصوص دینامیک سیالات داشته است. نرم‌افزارهایی بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی از جمله ANSYS Fluent، ANSYS CFX، Star CCM کمک شایانی در مراحل ابتدایی طراحی و تحلیل شناورها دارند. در بعضی موارد حتی پیش از مطالعات آزمایشگاهی از تحلیل این نرم‌افزارها استفاده می-شود و سپس با نتایج حاصل از آزمایش‌ها صحت‌سنجی می‌شوند.

کلمنت و بلونت [۴] در سال ۱۹۶۳ به بررسی آزمایشگاهی مقاومت بر روی یک مجموعه از شناورهای سرشی پرداختند و پارامترهای مختلفی از جمله نسبت طول به عرض، محل مرکز جرم و غیره را در آب غیر مواج مورد بررسی قرار دادند. فریدزما [۵] در سال ۱۹۶۹ تحقیقات آزمایشگاهی را بر روی اثر زاویه خیزش کف، جابه‌جایی، نسبت طول به عرض و محل مرکز جرم یک مجموعه از شناورهای سرشی در آب غیر مواج انجام داد و پاسخ‌های حرکت و شتاب‌های این شناورها را در امواج محاسبه کرد. ساویتسکی و براون [۶] درسال ۱۹۷۶ روش نیمه تجربی را برای تخمین مقاومت در آب غیر مواج، مقاومت افزوده و شتاب‌ها در امواج و نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنه‌های سرشی منشوری شکل ارائه کردند. آنها برای محاسبه نیروهای بالابر، پسا و گشتاورهای حاصل از امواج، از ترکیبی از تحلیل تئوری لایه مرزی، دینامیک سیالات پتانسیلی و داده‌های تجربی آزمایشگاهی استفاده کردند. همچنین با استفاده از روابط تجربی استخراج‌شده از داده‌های گسترده آزمون حوضچه‌ای، امکان تخمین دقیق اثرات کوبش و حرکات نوسانی فراهم گردید. ساریوز و کونکر [۷] در سال ۱۹۹۵ با تمرکز بر بهبود معیارهای طراحی دریامانی برای شناورهای پرسرعت، دو رویکرد تحلیلی را به‌منظور بهینه‌سازی فرم بدنه از نظر رفتار دینامیکی در امواج ارائه کردند. آن‌ها در پژوهش خود از ترکیب مدل‌سازی عددی و روش‌های طراحی مهندسی بهره گرفتند تا پارامترهای موثر بر عملکرد دریامانی، از جمله جابجایی بدنه، مرکز جرم، و فرم هندسی خطوط بدنه را در قالب یک چارچوب تحلیلی سیستماتیک بررسی کنند. هدف آن‌ها کاهش پاسخ‌های نامطلوب حرکاتی نظیر هیو و پیچ، و به حداقل رساندن شتاب‌های عمودی بود که موجب کاهش راحتی سرنشینان و افزایش خطر کوبش بود. خسروی بابادی و قاسمی [۸] در سال ۲۰۱۳ با هدف بررسی کمی تأثیر ویژگی‌های هندسی بدنه بر عملکرد دریامانی شناورها، پژوهشی ترکیبی را به روش عددی و تجربی انجام دادند. در این مطالعه، تمرکز اصلی بر تأثیر ضرایب فرم بدنه بر روی پارامترهای کلیدی دریامانی مانند حرکات هیو و پیچ، شتاب عمودی، و مقاومت افزوده در امواج بود. آنها برای تحلیل عددی، از تکنیک شبکه‌های عصبی مصنوعی بهره گرفتند تا رابطه‌های غیرخطی و پیچیده میان پارامترهای ورودی و خروجی‌های دینامیکی (رفتار دریامانی) را مدل‌سازی کنند. در کنار آن، برای صحت‌سنجی نتایج شبکه عصبی و افزایش دقت پیش‌بینی، از تکنیک برازش چندجمله‌ای استفاده کردند تا مدل‌های ریاضی قابل تحلیل برای مهندسان فراهم شود. .کیم و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۳ با استفاده از سه مدل مختلف طراحی شده از بدنه‌های سرشی و اجرای آزمایش-ها در حوضچه کشش به محاسبه عملکرد دریامانی و مقاومت افزوده آن‌ها پرداختند، تا بتوانند بهترین مدل را انتخاب کنند. سان و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۵ یک شناور سه بدنه را در حوضچه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.9]

کشش آزمایش کردند و با در نظر گرفتن مواردی از جمله تغییر محل مرکز جرم و اثر جت هوا عملکرد دریامانی آن شناور را بررسی کردند. آن‌ها در بررسی‌های خود مقاومت افزوده، حرکت‌های هیو و پیچ را محاسبه کردند. میراندا و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۷ یک شناور سرشی پله‌دار را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. شناور مورد بررسی تنها یک پله داشت و آن‌ها اثر این پله‌ی قرار داده شده در طراحی بدنه را بررسی کردند. کوسینوتا و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۷ با تمرکز بر کاهش مقاومت هیدرودینامیکی شناورهای سرشی در سرعت‌های بالا، پژوهشی تجربی را بر پایه طراحی و ارزیابی عملکرد چهار پیکربندی مختلف از بدنه‌های سرشی با استفاده از سیستم تزریق هوای مصنوعی انجام دادند. در این مطالعه، هدف اصلی بررسی اثر ایجاد لایه حباب هوا در زیر بدنه شناور به‌عنوان یک روش نوین برای کاهش اصطکاک و مقاومت کل بود، به‌ویژه در فاز سرشی که اصطکاک بدنه با آب نقش عمده‌ای در مصرف انرژی و کارایی شناور دارد. نیک‌سرشت و پیرایش [۱۳] در سال ۲۰۱۷ برای تحلیل حرکات دو درجه آزادی یک شناور سرشی، یک مدل نمونه تهیه و این مدل را در آب غیر مواج و مواج آزمایش کردند و اطلاعاتی نظیر نیروی پسآ و زاویه تریم این شناور را بدست آوردند. یاو و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۷ با بهره‌گیری از روش عددی Rankine Source در حوزه فرکانس و انجام آزمایش‌های تجربی، تأثیر عمق کم آب را بر عملکرد دریامانی یک شناور بررسی کردند. آن‌ها با مدلسازی دقیق و اعتبارسنجی نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی، توانستند پارامترهایی مانند نیروی مقاوم ناشی از موج، جرم افزوده، و الگوهای ناپایدار موج را در شرایط مختلف تحلیل کنند. نتایج نشان داد که کاهش عمق آب موجب افزایش نیروهای هیدرودینامیکی و تغییر در پاسخ حرکتی شناور می‌شود که نقش مهمی در طراحی و بهره‌برداری از شناورها در مناطق کم‌عمق دارد. سان و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۸ به بررسی مقایسه‌ای عملکرد دریامانی چند مدل طراحی شده از یک شناور تندرو با روش ۲/۵ بعدی و آزمایش یکی از مدل‌ها در مقیاس کوچک در حوضچه کشش و آزمایش یک مدل دیگر در مقیاس بزرگ در امواج واقعی دریا پرداختند. همچنین آنها با نصب پره‌های پایدارکننده بر روی یک مدل دیگر اثر این پره‌ها را بر عملکرد دریامانی این شناور ارزیابی کردند.

فالتینسن و سان [۱۶] در سال ۲۰۰۷ با به‌کارگیری روش (2.5D)، عملکرد دریامانی شناورهای سرشی را مورد بررسی قرار دادند. در این روش که ترکیبی از تحلیل دوبعدی مقطعی و درنظر گرفتن اثرات سه‌بعدی به‌صورت تقریبی است، پاسخ دینامیکی شناور به تحریکات هیدرودینامیکی از جمله امواج و حرکت بدنه تحلیل شد. نتایج این مطالعه نشان داد که روش ۲.۵ بعدی می‌تواند با دقت قابل‌قبولی نیروهای هیدرودینامیکی و رفتار حرکتی شناورهای سرشی را پیش‌بینی کند. یلماز و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۱ با استفاده از تئوری نواری و روش Frank Close-Fit، به بررسی گروهی از شناورهای تندرو پرداختند. آن‌ها با تعریف دو دسته از پارامترهای طراحی—پارامترهای اصلی (مانند نسبت طول به عرض، زاویه تریم، و شکل خط آب) و پارامترهای ثانویه (مانند مکان مرکز جرم و ویژگی‌های ساختاری بدنه) تلاش کردند تا تأثیر هر یک بر عملکرد دریامانی و هیدرودینامیکی شناورها را تحلیل کنند. هدف آن‌ها یافتن فرم بدنه‌ای بهینه بود که در عین حفظ سرعت و پایداری، مقاومت هیدرودینامیکی کمتری داشته باشد. کستیگ‌لیونه و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۱ با در نظر گرفتن معادلات RANS ناپایا به بررسی قابلیت این روش برای پیش‌بینی خصیصه‌های دریامانی یک شناور دو بدنه پرداختند. آن‌ها با شبیه‌سازی دقیق جریان اطراف شناور، حرکات بدنه در پاسخ به امواج، اثرات تیزی موج بر رفتار حرکتی شناور، و مقاومت افزوده ناشی از حضور امواج را محاسبه و تحلیل کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که حل معادلات RANS ناپایا می‌تواند با دقت مناسبی پدیده‌های پیچیده هیدرودینامیکی از جمله اندرکنش موج و بدنه و مقاومت موجی را پیش‌بینی کند. وانگ و همکاران در مطالعه‌ای، به بررسی عملکرد دینامیکی شناورهای سرشی در مواجهه با امواج منظم پرداخته‌اند. در این تحقیق، برای تحلیل دقیق رفتار هیدرودینامیکی شناور، از معادلات RANS همراه با روش حجم سیال استفاده شده است. این ترکیب عددی امکان شبیه‌سازی دقیق جریان‌های آشفته و سطح آزاد آب را فراهم می‌آورد. برای افزایش دقت نتایج، از تکنیک مش‌بندی تطبیقی و روش مش دینامیک یکپارچه استفاده شده است. این روش‌ها به شبیه‌سازی دقیق‌تر نیروهای هیدرودینامیکی و بهبود کارایی محاسباتی کمک کرده‌اند. شن و وان [۲۰] در سال ۲۰۱۳ با به کار بردن معادلات RANS مقاومت افزوده و حرکت‌های هیو و پیچ یک شناور جنگی در امواج منظم را محاسبه کردند. در این مطالعه، کشتی با دو درجه آزادی مدل‌سازی شده و تأثیر امواج مستقیم بر حرکت‌های هیو و پیچ آن بررسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه امواج مستقیم بر افزایش مقاومت کشتی و تغییر در الگوهای حرکتی آن بوده است. موسوی‌راد و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۱۵ با در نظر گرفتن معادلات RANS ناپایا به مطالعه و بررسی عملکرد هیدرودینامیکی و بارهای کوبشی یک بدنه سرشی در آب غیر مواج و مواج و همچنین در شرایط آب عمیق و کم عمق همراه با آزادی هیو و پیچ در امواج منظم پرداختند و نتایج حاصل را با نتایج آزمایشگاهی و روابط نیمه تجربی ساویتسکی مقایسه کردند. کیم و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۱۷ با استفاده از معادلات RANS ناپایا و پتانسیل سه بعدی حرکات و مقاومت افزوده یک شناور را در امواج منظم محاسبه و نتایج حاصل را با هم مقایسه کردند در این مطالعه تأثیر امواج مستقیم بر حرکت‌های هیو

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.9]

و پیچ آن بررسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه امواج مستقیم بر افزایش مقاومت کشتی و تغییر در الگوهای حرکتی آن بوده است. نیک‌سرشت و معصومی [۲۳] در سال ۲۰۱۷ با در نظر گرفتن پارامترهای مهم طراحی از جمله جرم، مرکز جرم، نسبت طول به عرض شناور و غیره اثر آن‌ها بر نیروی پسآ و ناپایداری طولی یک شناور سرشی در آب غیر مواج و مواج را مورد مطالعه قراردادند. در این تحقیق، از روش‌های عددی مبتنی بر حل معادلات RANS به‌طور ناپایا برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفته و تأثیر آن‌ها بر رفتار شناور استفاده شده است، همچنین در این تحقیق از روابط نیمه تجربی ساویسکی نیز استفاده شد و نتایج با هم مقایسه شدند. قاسمی و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۱۸ با به کار بردن روش شبکه عصبی به بررسی عملکرد دریامانی یک شناور در امواج نامنظم پرداختند. این روش به دلیل قابلیت بالای یادگیری و مدل‌سازی روابط غیرخطی پیچیده بین متغیرهای مختلف هیدرودینامیکی، ابزاری مؤثر برای تحلیل عملکرد شناور در شرایط دریایی پیچیده به شمار می‌رود. در این مطالعه، داده‌های ورودی شامل پارامترهای موج، ویژگی‌های هندسی شناور و شرایط عملیاتی بود که به شبکه عصبی آموزش داده شد. سپس شبکه عصبی توانست پاسخ‌های دینامیکی شناور از جمله حرکت‌های هیو، پیچ و نیروهای وارد بر بدنه را در امواج نامنظم به‌دقت پیش‌بینی کند. نیک‌سرشت و صفری [۲۵] در سال ۲۰۱۸ بدنه یک شناور سرشی را در امواج مورد بررسی قرار دادند و به بررسی پروفیل موج روی بدنه و اثر موج بر مقاومت افزوده پرداختند. در این مطالعه، با استفاده از روش‌های عددی و شبیه‌سازی‌های دقیق، تغییرات فشار و توزیع امواج اطراف بدنه در شرایط مختلف دریایی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که شکل و ویژگی‌های پروفیل موج روی بدنه تأثیر قابل توجهی بر میزان مقاومت افزوده دارد و این مقاومت می‌تواند به طور قابل توجهی بر مصرف سوخت و کارایی شناور اثرگذار باشد. نیک-سرشت و معصومی [۲۶] در سال ۲۰۱۹ به تحلیل رفتار هیدرودینامیکی شناورهای سرشی در مواجهه با امواج منظم پرداختند. در این مطالعه، شبیه‌سازی‌های عددی بر اساس حل معادلات RANS به‌طور ناپایا انجام شد و حرکت شناور در دو درجه آزادی، یعنی هیو و پیچ در شرایط مختلف عمق آب بررسی گردید. نتایج نشان داد که عمق آب به طور قابل توجهی بر مقاومت افزوده ناشی از امواج و پاسخ‌های دینامیکی شناور اثرگذار است. در شرایط آب کم‌عمق، تداخل امواج با کف دریا باعث افزایش مقاومت افزوده و تغییر الگوی حرکت هیدرودینامیکی شناور شد، در حالی که در آب عمیق این تأثیرات کمتر مشاهده گردید. در سال ۲۰۲۰ شیائوشنگ و همکاران [۲۷] با استفاده از روش عددی RANS و overset به شبیه‌سازی عملکرد دریامانی شناورهای سرشی در امواج منظم با ارتفاع موج زیاد پرداخته است. نتایج نشان داد شناور بهبود یافته نسبت به نمونه اولیه عملکرد بهتری دارد و کاهش سرعت به بهبود دریامانی آن کمک می‌کند. همچنین تأثیر طول موج و وضعیت ناوبری بر پاسخ حرکتی شناور به‌طور جامع بررسی شده است. همچنین در سال ۲۰۲۳ سالواتور و همکاران [۲۸] به بررسی عملکرد دریامانی یک بدنه سرشی در امواج منظم با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار پرداختند. این روش عددی بدون شبکه، امکان شبیه‌سازی دقیق اندرکنش‌های پیچیده بین موج و بدنه را فراهم کرده و برای تحلیل حرکات هیو، پیچ، و برخورد موج با بدنه در سرعت‌های بالا مناسب است. در این مطالعه، مدل‌سازی سه‌بعدی و غیرخطی حرکات شناور در امواج بررسی شد و نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های تجربی موجود مقایسه گردید. در سال ۲۰۲۴ سئول و همکاران [۲۹] عملکرد دریامانی یک بارج در امواج با استفاده از مدل ترکیبی CFD و پتانسیل اصلاح‌شده (CMP) مورد بررسی قرار گرفت. نویسندگان با تلفیق دقت روش‌های CFD در مدل‌سازی جریان‌های آشفته و کارایی مدل‌های پتانسیلی، به شبیه‌سازی حرکات شش درجه آزادی بارج در امواج منظم پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مدل CMP می‌تواند دقت مناسبی در پیش‌بینی حرکات هیو، پیچ و رول داشته باشد. این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های ترکیبی می‌تواند راه‌حلی مؤثر برای تحلیل عملکرد دریامانی شناورها با دقت و سرعت بالا باشد. همچنین خسروی بابادی و قاسمی در سال ۲۰۲۴ با هدف بهینه سازی عملکرد دریامانی شناور به بررسی تأثیر ضرایب هندسی بدنه شامل ضریب میان‌بدنه (CM) و ضریب پرشدگی (CB) بر پاسخ‌های دینامیکی شناور پرداختند [۲۷]. آن‌ها با تولید ۶۴ فرم بدنه و ارزیابی آن‌ها در امواج مختلف با استفاده از تئوری نواری، نشان دادند که تغییر این ضرایب تأثیر قابل توجهی بر کاهش حرکت پیچ و شاخص بیماری حرکتی (MSI) دارد، در حالی که تأثیر آن‌ها بر حرکات هیو، رول و مقاومت افزوده کمتر است. در نهایت، با بهره‌گیری از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی، فرم‌های بدنه‌ای پیشنهاد شد که ضمن حفظ پارامترهای طراحی اولیه، عملکرد بهتری از نظر راحتی و پایداری دریا ارائه می‌دهند.

با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه شناورهای سرشی و پدیده دریامانی بر روی شناورهای مختلف که به آنها اشاره شد، در این تحقیق با در نظر گرفتن بدنه یک شناور سرشی (DTMB۴۶۶۷-۱) عملکرد دریامانی این شناور در دو درجه آزادی (هیو و پیچ) بررسی می‌شود. عملکرد دریامانی این شناور با محاسبه عملگر پاسخ دامنه این دو درجه آزادی ارزیابی می شود. بررسی صورت گرفته در امواج شامل شرایط مختلف از جمله سه طول موج مختلف و سه ارتفاع مختلف موج می‌باشد که نتایج این شرایط محاسبه و مقایسه شده‌اند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.9]

۲- معادلات حاکم

عملکرد هیدرودینامیکی یک شناور در مسائل هدایت، ناوبری و کنترل اهمیت زیادی دارد. شبیه‌سازی دینامیکی معادلات حرکت یک ابزار مفید در جهت بررسی نحوه عملکرد هیدرودینامیکی شناور می‌باشد. برای حل معادلات حرکت باید نیروها و گشتاورهای وارد بر شناور معلوم باشند [۱]. معادله بقای جرم یا پیوستگی از جمله معادلات مورد استفاده در حل مسائل مرتبط با جریان سیالات می‌باشد. این معادله در تمام میدان‌های جریان صادق خواهد بود. در صورت تراکم ناپذیر بودن سیال معادله پیوستگی با رابطه (۱) بیان می‌شود :

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0.0 \qquad (۱)$$

معادله بقای اندازه حرکت خطی که به معادلات ناویر- استوکس معروف هستند در جریان‌های آشفته با استفاده از متوسط‌گیری زمانی به معادلات RANS تبدیل می‌شوند. فرم کلی روابط ناویر- استوکس به شکل رابطه (۲) می‌باشد [۲۳].

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j)=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\nu+\nu_t)(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i})\right]+g_i \qquad (۲)$$

در جریان آشفته ضریب لزجت سینماتیکی در رابطه (۲) به صورت $\nu+\nu_t$ نوشته می‌شود که ν لزجت سینماتیکی سیال و ν_t معرف لزجت سینماتیکی آشفتگی می‌باشد. همچنین پارامترهای مورد نیاز در حرکت شش درجه آزادی یک شناور، در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱-کمیت‌های مورد استفاده در معادله‌های حرکت یک شناور [۱]

نیرو، گشتاور	شتاب‌های خطی و زاویه‌ای	سرعت‌های خطی و زاویه‌ای	جهتهای حرکت	درجات آزادی
Z	$\dot{w}$	w	z	Heave
M	$\dot{q}$	q	θ	Pitch

برای بدست آوردن معادلات حرکت شناور از تعاریف اندازه حرکت خطی و زاویه‌ای استفاده می‌شود. در صورت انتخاب محل مبدأ مختصات به نحویکه ثابت و متصل به زمین و همچنین با محل مرکز جرم متفاوت باشد، تانسور اینرسی قطری خواهد شد. با توجه به اینکه در این تحقیق حرکات شناور تنها در دو جهت هیو وپیچ بررسی می شوند بنابراین معادلات حرکت به صورت زیر بیان می شوند که x_G , y_G , z_G مولفه‌های بردار فاصله مرکز جرم شناور تا مبدأ مختصات، m جرم شناور و I تانسور گشتاور اینرسی شناور حول محورهای مختصات می‌باشند. بنابراین معادلات حرکت به صورت روابط (۳و۴) ساده خواهند شد [۱].

$$m\left[\dot{w}-x_G\dot{q}-z_G q^2\right]=Z \qquad (۳)$$

$$I_y\dot{q}-m\left[x_G\dot{w}-z_G wq\right]=M \qquad (۴)$$

برای ردیابی سطح آزاد در جریان دوفازی از روش حجم سیال استفاده شده است. این روش از جمله روش‌های ردیابی حجم سیال و از پرکاربردترین آن‌ها به شمار می‌رود. اساس این روش این است که دو یا چند فاز سیال که در کنار هم هستند با یکدیگر مخلوط نمی‌شوند. ایده اصلی روش حجم سیال معرفی یک تابع φ است که مقدار آن در هر سلول که توسط سیال مرجع اشغال شده باشد برابر یک و در سلولهای خالی از سیال مرجع صفر می‌باشد [۲۳].

- $\varphi=1$ معرف سلول پر شده توسط سیال مرجع است.
- $\varphi=0$ معرف سلول خالی از سیال مرجع است.
- $0<\varphi<1$ معرف سلولی است که بخشی پر و بخشی خالی از سیال مرجع می‌باشد، در واقع معرف سلول در برگیرنده سطح آزاد است. معادله این روش در رابطه (۵) ارائه شده است.

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t}+\boldsymbol{V}.(\boldsymbol{\nabla}\varphi)=0 \qquad (۵)$$

زمانیکه شناور سرعتی نداشته باشد، فرکانس امواج منطبق بر فرکانس حرکت شناور ناشی از برخورد امواج خواهد بود. اما زمانی که شناور با سرعت مشخصی در حال حرکت باشد، فرکانس مشاهده شده از شناور با فرکانس امواج متفاوت خواهد بود. در این حالت فرکانسی را که شناور تجربه می‌کند فرکانس برخورد می‌نامند. رابطه فرکانس برخورد بر اساس راستای شناور و دستگاه مختصات ارائه شده در مرجع [۲۸] به صورت رابطه (۶) می‌باشد.

$$f_e=f-\frac{2\pi f^2 U}{g}cos(\chi) \qquad (۶)$$

χ زاویه برخورد و U سرعت شناور می‌باشد. در کار حاضر مقدار χ با توجه به محور مختصات مرجع [۲۸] برابر ۱۸۰ درجه می باشد. عملگرهای پاسخ دامنه در واقع توابع انتقالی هستند که برای بررسی دامنه حرکت‌های مختلف شناور در امواج مورد استفاده قرار می‌گیرند. به این ترتیب که دامنه حرکت‌های شناور نسبت به برخی از پارامترهای موج سنجیده می‌شود و نتایج به صورت یک نسبت عددی گزارش می‌شوند. در مباحث دریامانی به طور معمول دامنه حرکت‌های هیو و پیچ که در ارتباط با یکدیگر می‌باشند، به کمک عملگرهای پاسخ دامنه مورد بررسی قرار می‌گیرند. از آنجا که در این تحقیق تنها به بررسی حرکات دو درجه آزادی هیو و پیچ پرداخته می‌شود، در ادامه روابط عملگر پاسخ دامنه مربوط به این دو درجه آزادی در روابط (۷و۸) ارائه شده‌اند.

$$RAO_{Heave}=\frac{\zeta_{Heave}}{\zeta_0} \qquad (۷)$$

$$RAO_{Pitch}=\frac{\zeta_{Pitch}}{k\zeta_0} \qquad (۸)$$

که در رابطه‌های فوق که ζ_{Heave}، ζ_{Pitch}، ζ_0 و k به ترتیب دامنه حرکت هیو، پیچ، دامنه موج و عدد موج می‌باشند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]

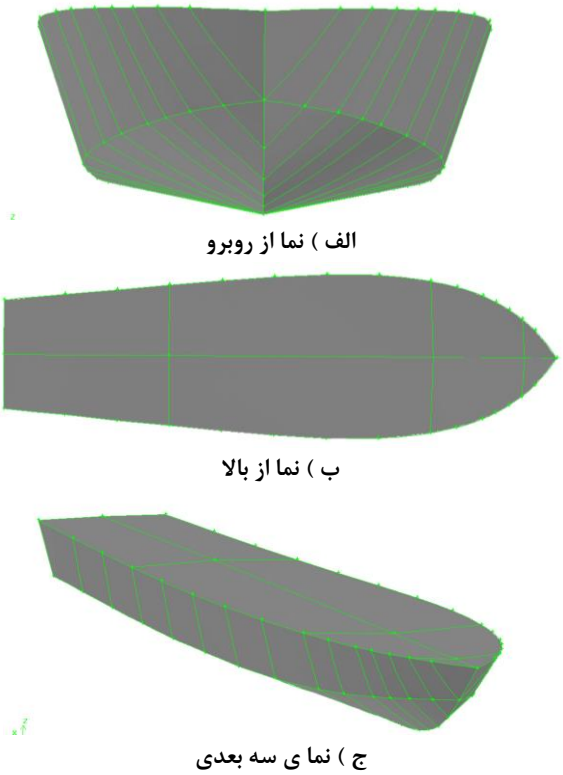
[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.9]

۳ – مدلسازی عددی

در این قسمت به بررسی پدیده دریامانی بر روی شناور سرشی DTMB۴۶۶۷-۱ پرداخته می‌شود. روش مورد استفاده در این تحقیق به صورت عددی می‌باشد و از نرم افزار ANSYS Fluent برای انجام محاسبات استفاده شده است. در ابتدا با در نظر گرفتن چند سرعت مختلف عملکرد شناور در آب غیر مواج مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج حاصل صحت‌سنجی می‌شوند. در ادامه به بررسی شناور در آب مواج پرداخته می‌شود. در آب مواج در ابتدا به بررسی میرایی موج در یک کانال پرداخته می‌شود و در ادامه اثرات طول موج و ارتفاع موج بر روی دریامانی شناور مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳ -۱- شناور سرشی DTMB ۴۶۶۷-۱

شناور DTMB ۴۶۶۷-۱ از جمله شناورهای سرشی از سری DTMB 62 می‌باشد که برای اولین بار در سال ۱۹۶۳ توسط کلمنت معرفی و بررسی شد [۴]. در طراحی بدنه شناورها معمولاً از تقسیم-بندی‌هایی در طول بدنه شناور و همچنین خطوط بدنه استفاده می-شود. این تقسیم‌بندی‌ها معمولاً بین ۱۰ تا ۲۰ عدد هستند و وابسته به طول و پیچیدگی بدنه شناور می‌باشند و در قسمت‌هایی از بدنه شناور که پیچیدگی‌ها از جمله انحناء و یا تغییرات بیشتر می‌باشد، از تقسیم‌بندی‌های کوچکتری استفاده می‌شود. در شکل (۱) نماهایی از بدنه ترسیم شده است. همچنین برخی از مشخصات این شناور در جدول ۲ ارایه شده است (شایان ذکر است که در شکل ۱ و جدول ۲ مبدا مختصات پاشنه شناور می‌باشد).



الف) نما از روبرو

ب) نما از بالا

ج) نما ی سه بعدی

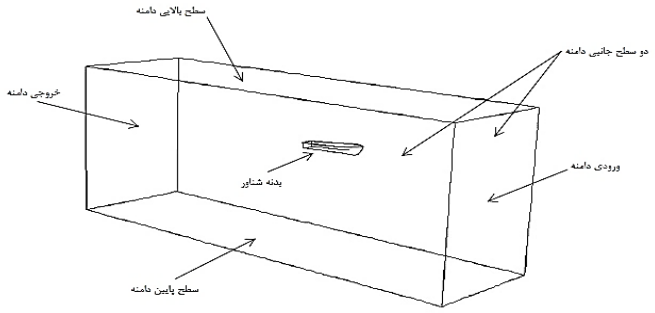
شکل ۱- نماهای مختلف شناور

جدول ۲-مشخصات هندسی شناور سرشی ۱-۴۶۶۷ [۲۶]

جرم (kg)	طول (m)	عرض متوسط (m)	بیشترین عرض (m)	طول مرکز جرم از پاشنه (m)	ارتفاع مرکز جرم (m)	زاویه پیچ استاتیکی (deg)
۱۰۰	۲/۴۴	۰/۴۸۸	۰/۵۹۷	۱/۰۹۴	۰/۱۳۸۵	-۰/۳۲

۳ -۲- ابعاد محاسباتی و شرایط مرزی

در شکل (۲) دامنه محاسباتی نشان داده شده است و در جدولهای ۳ و ۴ ابعاد دامنه و شرایط مرزی ارائه شده‌اند. برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۴] عمق آب در شبکه ۴ متر لحاظ شده‌است. ارتفاع سطح آزاد آب با توجه به محل مبدأ مختصات تعریف شده بر روی شناور برابر با ۰/۱ متر می‌باشد. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، راستای مثبت محور طولی به سمت انتهای دامنه محاسباتی و بر روی خط میانی بدنه شناور می‌باشد. ضمناً مبدأ مختصات در نرم‌افزار ANSYS Fluent برای انجام محاسبات و مختصات دهی مرکز جرم، انتهای شناور در نظر گرفته شده است.



شکل ۲-نمای کلی از دامنه محاسباتی

جدول ۳- ابعاد دامنه محاسباتی

بخش‌های دامنه	ابعاد (m)	ابعاد بر اساس طول شناور (L)
طول	۱۷/۲	۷ L
عرض	۵	۲ L
ارتفاع	۶/۴	۲/۶ L
عمق آب	۴	۱/۶۴ L
فاصله در جلوی شناور	۵/۳۸	۲/۲ L
فاصله در پشت شناور	۹/۳۸	۳/۸۴ L
ارتفاع سطح آزاد آب از پاشنه شناور (آبخور)	۰/۱	-

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]
[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.9]

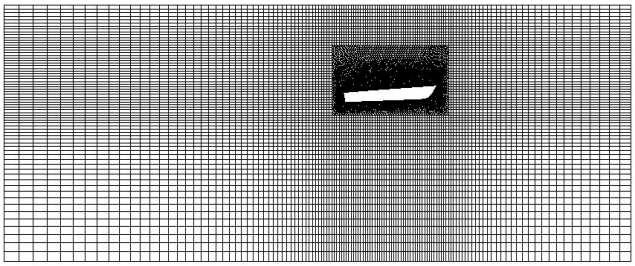
جدول ۴-شرایط مرزی دامنه محاسباتی

دامنه	نوع شرط
ورودی	Velocity Inlet + wave
خروجی	Outflow
سطح بالا	Symmetry
سطح پایین	Symmetry
دو سطح جانبی	Symmetry
بدنه شناور	Wall: No Slip-Stationary

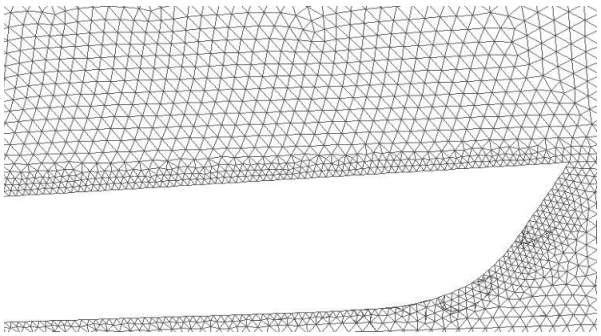
شرط مرزی تقارن به این مفهوم است که در راستای عمود بر سطوح تغییرات رخ نمی‌دهد. همچنین شناور ثابت در نظر گرفته شده است و جریان با سرعت‌های مد نظر از ورودی وارد دامنه محاسباتی و سپس از انتهای آن خارج می‌شود. شایان ذکر است که با توجه به اینکه شناور در فاز سرشی است و عدد فرود عمقی آن در شراط سرشی عموما بیشتر از ۱ یا نزدیک به یک است بنابراین در این شرایط امواج انتشار یافته از بدنه بیشتر امواج طولی است و همچنین با توجه به شرط مرزی outflow ااحتمال انعکاس موج و رسیدن آن به شناور و ایجاد خطا بسیار کم است. ولی در فازهای جابجایی و نیمه جابجایی به خصوص در طول موجهای بلند باید فاصله دیواره های جانبی و همچنین پشت جسم معمولا بیشتر در نظر گرفته شود تا زمان کافی جهت اجرای برنامه قبل از انعکاس موج وجود داشته باشد و یا در بعضی حالات نیز می توان از تضعیف کننده موج (Numerica beach) در انتهای دامنه محاسباتی استفاده کرد..

۳ -۳- شبکه بندی دامنه محاسباتی

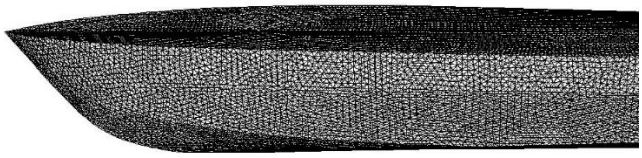
برای بررسی حرکت شناور در شبکه‌بندی ناحیه محاسباتی دو ناحیه مجزا در نظر گرفته شد. ناحیه اول که در نزدیکی و اطراف بدنه شناور می‌باشد با روش غیرساختار یافته و ناحیه دوم که دورتر از بدنه و در واقع در برگیرنده بدنه شناور و ناحیه اول می‌باشد، با روش ساختار یافته شبکه‌بندی شده‌اند. ناحیه نزدیک به بدنه شناور که به صورت غیرساختاریافته شبکه‌بندی شد، به دلیل بررسی حرکات شناور در شرایط مورد بررسی به عنوان شبکه دینامیکی در تحلیل‌ها در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۳ نماهایی از شبکه‌بندی صورت گرفته ارائه شده است.



الف) نمای کلی شبکه بندی



ب) شبکه‌بندی غیرساختاریافته در ناحیه نزدیک بدنه شناور



ج) شبکه‌بندی غیرساختاریافته روی بدنه شناور

شکل ۳-نماهایی از شبکه بندی

شبکه‌بندی به این ترتیب صورت گرفت که از روی بدنه شناور به اندازه ۰/۰۱۵ متر شبکه‌بندی شروع شده است و در ناحیه شبکه غیرساختار یافته هرچقدر که از بدنه فاصله گرفته شود، فاصله بین گره‌ها رفته رفته بیشتر می‌شود. در قسمت‌های مختلف شبکه ساختار یافته نسبت‌های تراکم متفاوتی با توجه به انطباق بین شبکه‌ها به کار رفته است. در نزدیکی شناور و در ناحیه شبکه غیرساختار یافته، شبکه از تراکم بیشتری برخوردار می‌باشد و با فاصله گرفتن از بدنه شناور این تراکم کاهش می‌یابد. در ناحیه شبکه ساختاریافته نسبت-های تراکم به نحوی انتخاب شده‌اند که فاصله بین گره‌های شبکه به طور ناگهانی تغییری نداشته باشند و بیشترین مقدار نسبت تراکم برابر با ۱/۰۵ در نظر گرفته شد.

۳ -۴-روش حل عددی

همانطور که بیان شد برای حل عددی معادلات سیالات از نرم‌افزار ANSYS Fluent استفاده شده است. که در ادامه تنظیمات صورت گرفته در این نرم‌افزار ارائه شده‌اند. لازم به ذکر است که بررسی حرکت شناور تنها در دو درجه آزادی هیو و پیچ صورت گرفته است و برای بررسی حرکات شناور از روش ۶ درجه آزادی استفاده شده است که با استفاده از یک UDF سایر درجات آزادی از ۶ درجه محدود شده‌اند [۲۶]. به علت وجود دو سیال آب و هوا در بخش مدل چند فازی برای ردیابی موقعیت سطح آزاد آب از روش حجم سیال استفاده شده است. جریان سیال لزج در نظر گرفته شده است و به علت آشفتگی در جریان اطراف بدنه شناور از روش Kω-SST که در مسائل دریایی نتایج را با دقت خوبی ارائه می‌دهد استفاده شده است. در این روش گزینه میرایی آشفتگی جهت میرا نشدن امواج با فاکتور میرایی برابر با عدد ۱۰۰ نیز در نظر گرفته شده است [۲۶]. همانطور که اشاره شد شبکه غیر ساختاریافته نزدیک بدنه شناور به عنوان

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.9]

شبکه دینامیکی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به حرکت جریان اطراف شناور، شبکه‌های این ناحیه دچار تغییر فرم می‌شوند، به همین دلیل از روش هموار کردن شبکه و تولید مجدد شبکه استفاده شده است. در روش هموار کردن شبکه گزینه Spring/Laplace/Boundary Layer انتخاب شده است. و مقادیر این گزینه در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

جدول ۵- مقادیر تنظیم شده در روش هموار کردن شبکه

Number of iteration	Convergence tolerance	Spring Constant Factor
۲۰	۰/۰۱۱	۰/۵

در جدول ۶ تنظیمات صورت گرفته در نرم‌افزار ارائه شده است. اندازه گام زمانی برابر با ۰/۰۰۰۱ در نظر گرفته شده است تا مقدار عدد کرنت حدود یک باقی بماند و حل تا زمانی پیش رفته است که تغییرات پارامترهایی مانند نیروی پسآ، حرکت هیو و زاویه پیچ تقریباً ثابت بمانند. در آب مواج، جهت تولید موج از شرایط موج به صورت Shallow/Intermediate waves و تئوری موج مرتبه اول استفاده شده است.

جدول ۶- تنظیمات حلگر

عنوان	روش
معادلات کوپل فشار و سرعت	SIMPLE
گسسته‌سازی فشار	Body Force Weighted
گسسته‌سازی اندازه حرکت	Second Order Upwind
گسسته‌سازی کسر حجمی	Modified HRIC

۴ – نتایج و بحث در نتایج

۴–۱- بررسی استقلال از شبکه و اعتبار سنجی

برای بررسی استقلال از شبکه در آب غیر مواج چهار شبکه در نظر گرفته شد که در جدول ۷ مشخصات آن‌ها ارائه شده‌اند و نتایج نیروی پسا با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۴] مقایسه شده‌اند.

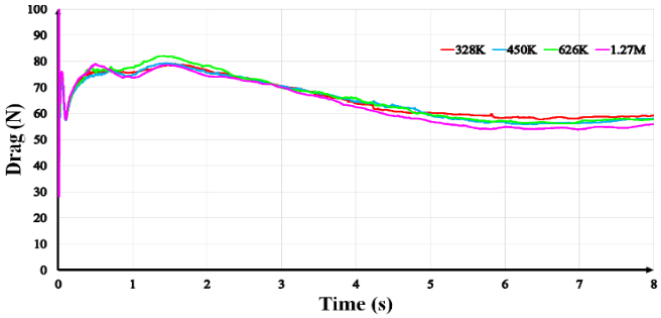
جدول۷- مشخصات شبکه‌های تهیه شده برای بررسی استقلال از شبکه

شبکه	تعداد گره	نسبت تقریبی افزایش گره‌های شبکه	فاصله گره‌ها روی بدنه شناور (متر)	حداکثر مقدار تراکم
۱	۳۲۸۷۹۷	–	۰/۰۲۵	۱/۰۷۵
۲	۴۵۰۶۵۲	$\sqrt{۲}$	۰/۰۲	۱/۰۶
۳	۶۲۵۹۲۰	$\sqrt{۲}$	۰/۰۱۵	۱/۰۵
۴	۱۲۷۵۷۷۲	۲	۰/۰۱	۱/۰۶

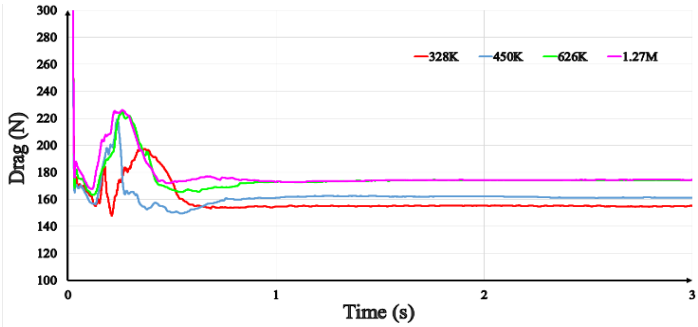
جدول۸-مقایسه نیروی پسا در سه شبکه مختلف با مرجع [٤]

سرعت	نیروی پسآ (N)				
U(m/s)	کلمنت [۴]	شبکه ۱	شبکه ۲	شبکه ۳	شبکه ۴
۲/۱۲	۶۲/۰۹۷	۵۸/۵۸	۵۶/۷۱	۵۷/۰۶	۵۷/۳۴
۸/۵۶	۱۶۱/۸۳	۱۵/۰۹	۱۶۱/۵۲	۱۷۳/۸	۱۷۴/۲۱

مقدار حداکثر تراکم در ناحیه ساختاریافته در جدول ۸ در شبکه‌های مختلف به نحوی تعیین شده‌اند که بین فاصله گره‌های شبکه‌ها تغییر ناگهانی رخ ندهد و همچنین تعداد گره‌ها در فاصله‌های دور از بدنه شناور بیش از اندازه افزایش پیدا نکنند و از زیاد شدن محاسبات جلوگیری شود. در شکل‌های ۴ و ۵ نمودارهای نیروی پسآ و همچنین زاویه پیچ در دو سرعت ۲/۱۲ و ۸/۵۶ متر بر ثانیه ارائه شده‌اند. توجه به این نکته بسیار حائز اهمیت می‌باشد که نمودارهای زاویه پیچ در این دو سرعت نسبت به موقعیت اولیه شناور ارائه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود در سرعت ۲/۱۲ در هر ۴ شبکه هم مقادیر نیروی پسا و هم زاویه پیچ تغییرات محسوسی ندارند ولی در سرعت ۸/۵۶ مقادیر نیروی پسا و زاویه پیچ تغییراتی را با تغییرات شبکه نشان می‌دهند و لی در دو شبکه ۳ و ۴ تغییرات بسیار کم است و به همین دلیل در کل محاسبات از شبکه ۳ استفاده شده است.



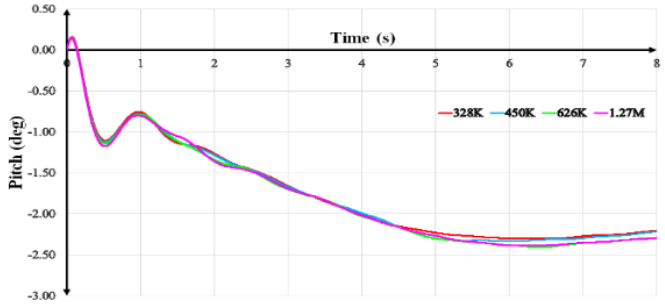
(الف) سرعت ۲/۱۲ متر بر ثانیه



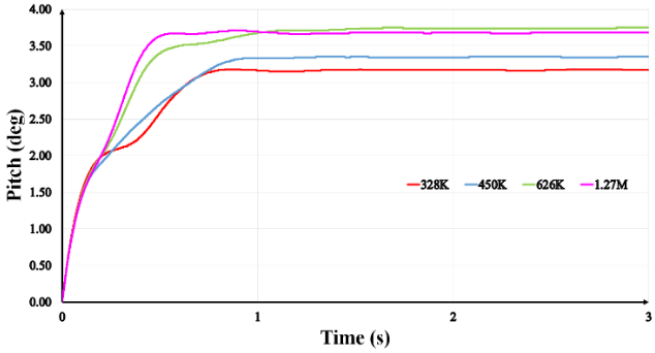
(ب) سرعت ۸/۵۶ ثانیه

شکل ۴-تاریخچه نیروی پسا برای ۴ شبکه انتخابی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]
[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.9]



(الف) سرعت ۲/۱۲ متر بر ثانیه



(ب) سرعت ۸/۵۶ ثانیه

شکل ۵-تاریخچه زاویه پیچ برای ۴ شبکه انتخابی الف)سرعت ۲/۱۲ متر بر ثانیه ب) سرعت ۸/۵۶ ثانیه

همچنین در جدول‌های ۹ تا ۱۱ و در سرعتهای مختلف مقادیر متوسط نیروی پسا، متوسط زاویه پیچ و همچنین سطح خیس شده با مراجع [۴و ۲۳] مقایسه شده‌اند و دقت قابل قبولی را نشان می دهند. در نهایت نیز در شکل ۶ مقادیر متوسط نیروی پسا برای این شبکه با مقادیر استخراج شده از مراجع [۴و ۲۳] مقایسه شده که از دقت مناسبی برخوردار هستند.

جدول۹- مقایسه مقادیر متوسط نیروی پسا با مرجع [۴ و ۲۳]

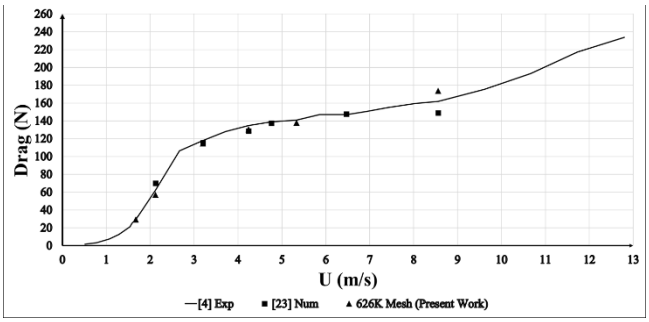
U (m/s)	عدد فرود حجمی	نتایج شبکهK ۶۲۶ (N)	نیروی پسا (N) کلمنت [۴]	نیروی پسا (N) مرجع [۲۳]
۱/۶۷	۰/۷۸	۲۹/۳۸۱	۲۹/۲۶۹	-
۲/۱۲	۰/۹۹	۵۷/۰۵۵	۶۲/۰۹۷	۷۰
۳/۲	۱/۵	۱۱۴/۷۳۹	۱۱۷/۸۳۳	۱۱۵/۵
۴/۲۴	۱/۹۹	۱۳۰/۵۰۰	۱۳۴/۸۲۵	۱۲۸/۵
۵/۳۳	۲/۵	۱۳۸/۰۰۴	۱۴۰/۹۶۳	-
۸/۵۶	۴/۰۱	۱۷۳/۷۹۷	۱۶۱/۸۲۶	۱۴۸/۹

جدول۱۰- مقایسه مقادیر متوسط زاویه پیچ با مرجع [۴ و ۲۳]

U (m/s)	نتایج شبکه ۶۲۶ K	کلمنت [۴]	مرجع [۲۳]
۱/۶۷	-۰/۴۲	-۰/۵۴	-
۲/۱۲	۰/۳۶	۰	۰/۱
۳/۲	۲/۹۸	۳/۰۲	۳
۴/۲۴	۲/۹۱	۴/۹	۳/۷
۵/۳۳	۳/۷	۵/۱	-
۸/۵۶	۵/۷۳	۳/۶۷	۴/۳

جدول۱۱- مقایسه مقادیر سطح خیس شده با مرجع [۴و ۲۳]

U (m/s)	نتایج شبکه ۶۲۶ K	کلمنت [۴]	مرجع [۲۳]
۱/۶۷	۱/۵۴۵	۱/۳۸	-
۲/۱۲	۱/۵۶۱	۱/۴۶	۱/۴۸
۳/۲	۱/۴۵۷	۱/۳۹	۱/۳۳
۴/۲۴	۱/۴۶۵	۱/۲۳	۱/۳
۵/۳۳	۱/۲۶۳	۱/۰۱	-
۸/۵۶	۰/۴۸۹	۰/۸	۰/۵۵



شکل ۶-مقایسه مقادیر متوسط نیروی پسا در شبکه ۳ با مراجع [۴ و ۲۳]

۴-۲- بررسی شناور در آب مواج

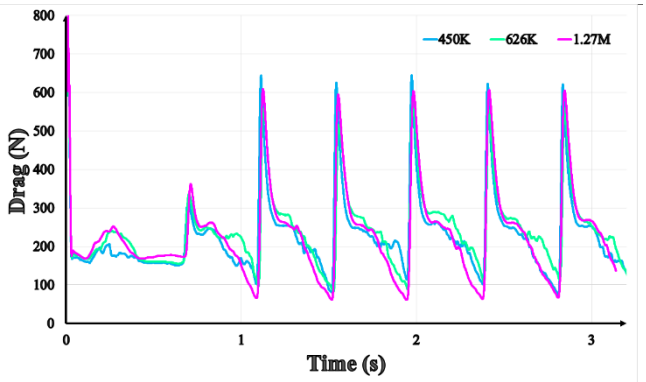
جهت بررسی شناور در آب مواج در ابتدا جهت اطمینان از تعداد مناسب شبکه مجددا در سرعت ۸/۵۶ متر بر ثانیه محاسبات انجام پذیرفته است و در ادامه در شرایط مختلف موج، در شبکه انتخاب شده نتایج بررسی شده‌اند.

۴-۲-۱- استقلال از شبکه در آب مواج

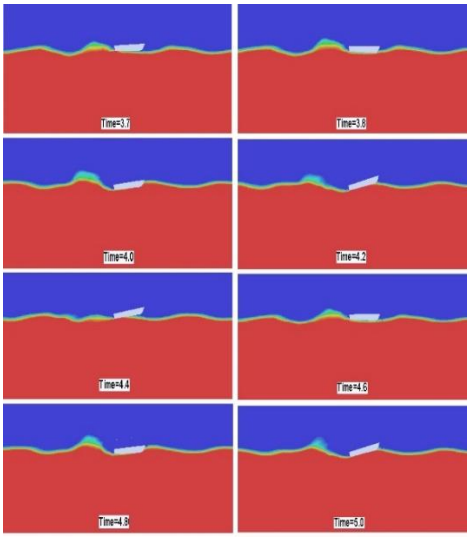
در آب مواج مجدد استقلال از شبکه در سه مقدار شبکه ۴۵۰۰۰۰ و ۶۲۶۰۰۰ و ۱۲۷۰۰۰۰ بررسی شده است و نتایج نیروی پسا برای این سه شبکه در سرعت ۸/۵۶ متر بر ثانیه در شکل ۷ رسم شده است. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می شود نیروی پسآ وارد بر بدنه شناور به صورت نوسانی می باشد. این نوسانات ناشی از حرکت شناور و تماس بدنه آن با موج می‌باشد، به این ترتیب که اگر شناور به نیم سیکل اول موج برسد و در حال بالا رفتن از موج باشد، سطح

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]
[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.9]

تماس آن با آب افزایش می‌یابد، بنابراین مقدار نیروی پسا نیز افزایش می‌یابد. مقدار بیشینه نیروی پسآ در بیشترین سطح تماس بدنه با آب حاصل می‌شود. در مدت زمان حرکت شناور از قله به دره موج به دلیل کم شدن سطح تماس آب با بدنه، مقدار نیروی پسآ کاهش می‌یابد و مقدار کمینه این نیرو در کمترین سطح تماس آب با بدنه رخ می‌دهد و در نیم سیکل بعدی موج این روند تکرار می‌شود. در شکل ۸ حالت‌های مختلف از موقعیت شناور در موج ارائه شده است.



شکل ۷- تاریخچه نیروی پسا با زمان برای ۳ شبکه انتخابی



شکل ۸-نمونه‌ای از حرکت شناور در موج در زمانهای مختلف $\frac{\lambda}{L}=۳$

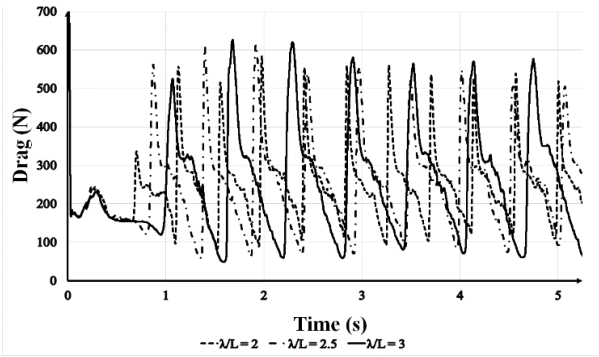
بر اساس شکل ۷ نیروی پسآ در سه شبکه مورد بررسی بسیار به یکدیگر نزدیک می‌باشند (به خصوص در مقادیر بیشینه نیروی پسا که در طراحی بسیار مهم می باشد دو شبکه K ۶۲۶ و M ۱/۲۷ به هم نزدیکتر هستند و در مقادیر متوسط نیز هر سه شبکه خیلی به هم نزدیک هستند) با توجه به مقدار y+ و همچنین ارتباط مدت زمان اجراها و تعداد گره‌های شبکه، در بررسی استقلال از شبکه در موج نیز تصمیم به استفاده از شبکه ۶۲۶ هزار گره‌ای گرفته شد. لازم به ذکر است که مدت زمان لازم برای اجرا در آب مواج بسیار بیشتر از آب غیر مواج می‌باشد.

۴-۲-۲- بررسی اثر سه نسبت مختلف $\frac{\lambda}{L}$ بر دریامانی شناور

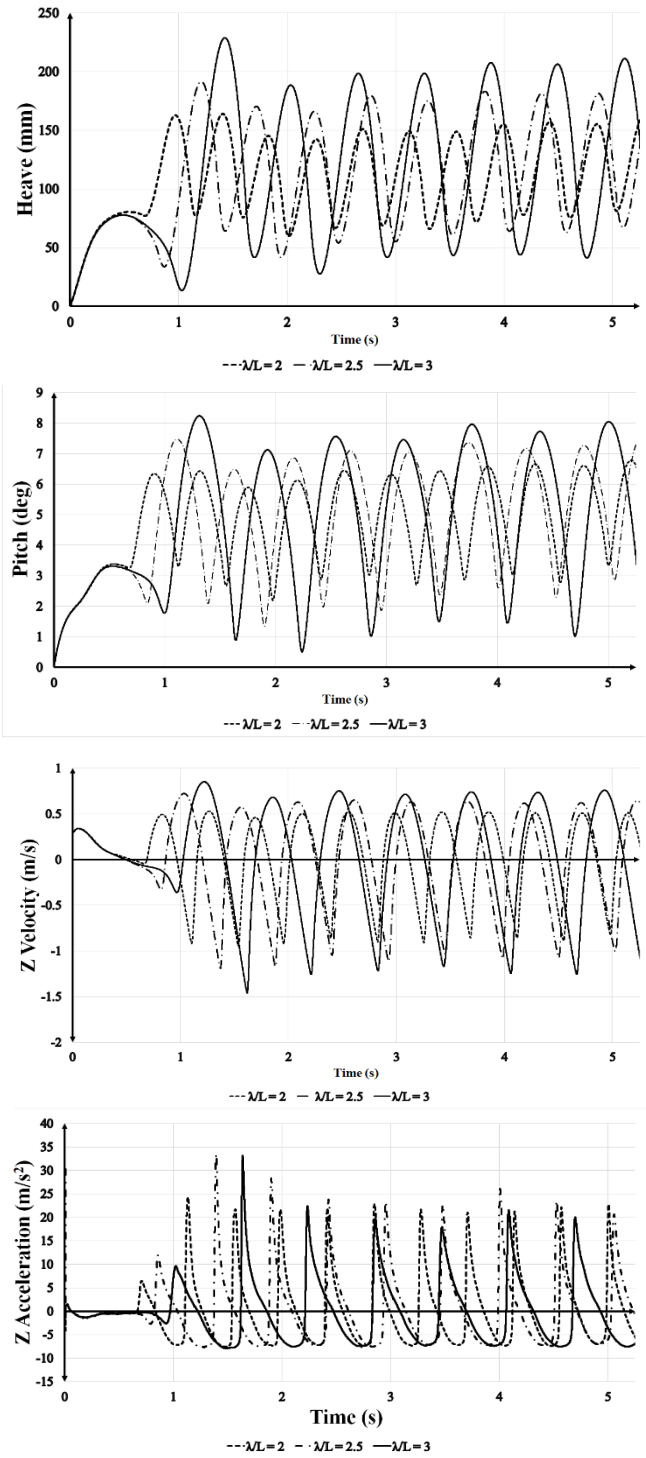
در این بخش با در نظر گرفتن سه طول موج مختلف به بررسی اثر طول موج بر روی حرکت شناور در امواج پرداخته شده است. لازم به ذکر است که با توجه به طول موج‌های مختلف سعی شده است که در دامنه محاسباتی به اندازه یک طول موج در جلو شناور فضا موجود باشد. بنابراین در ابعاد شبکه و تعداد گره‌ها تغییراتی ایجاد شده است که در جدول ۱۲ حالت‌های مختلف ارائه شده‌اند. در ادامه به عنوان نمونه تاریخچه نیروی پسآ، حرکت هیو، زاویه پیچ، سرعت و شتاب در مرکز جرم در راستای عمود در سرعت ۸/۵۶ متر بر ثانیه در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. همانطور که در بخش مقدمه نیز بیان شد شناورهای سرشی به دلیل ماهیت پر سرعت خود مستلزم تحمل شتابهای کوبش زیاد می‌باشند که این شتابها عملا ناشی از شتابهای قائم هستند. با توجه به زیاد بودن این شتابها در این نوع شناور معیارهای دیگر دریامانی مانند دریازدگی از اهمیت کمتری برخوردارند و خدمه باید تحمل زیادی نسبت به این شتابهای زیاد تکراری داشته باشند. حداکثر مجاز این شتاب برای شناورهای پروازی برابر ۴g می‌باشد [۱]. با توجه به شکل ۹، مشاهده می شود که بعد از یکنواخت شدن حرکات شناور بیشترین شتاب در نسبت طول موج ۲/۵ رخ می دهد و مقدار آن برابر ۲/۶g می باشد. بنابراین عملکرد دریامانی این شناور با در نظر گرفتن معیار شتاب کوبش در مرکز جرم که یکی از مهمترین معیارها می‌باشد در محدوده مجاز و قابل قبول قرار دارد.

جدول۱۲- مشخصات مربوط به بررسی شناور در موج در سه نسبت λ/L

تعداد کل نقاط شبکه	فاصله از جلوی شناور (متر)	طول کل دامنه (متر)	زاویه برخورد امواج	ارتفاع موج (متر)	طول موج (متر)	λ/L
۶۲۵۹۲۰	۵/۳۸	۱۷/۲	۰	۰/۲	۴/۸۸	۲
۶۳۸۵۴۷	۶/۱۸	۱۸	۰	۰/۲	۶/۱	۲/۵
۶۵۵۳۸۳	۷/۳۸	۱۹/۲	۰	۰/۲	۷/۳۲	۳

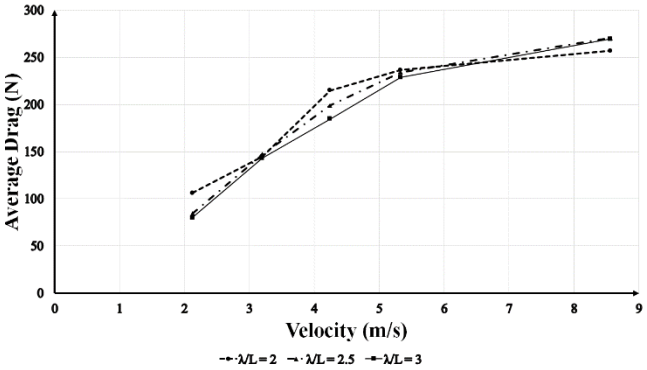


[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]
[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.9]

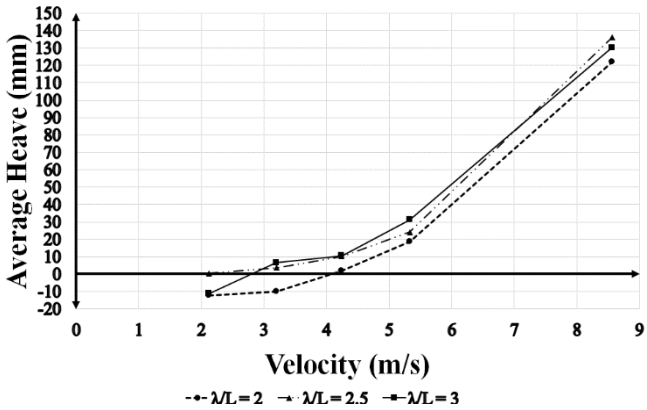


شکل ۹-تاریخچه پارامترهای مختلف شناور در سرعت ۸/۵۶ متر بر ثانیه در نسبت طول موجهای مختلف

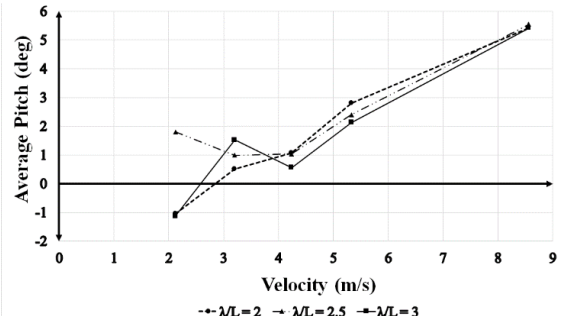
در شکلهای ۱۰ تا ۱۲، متوسط بیشینه و کمینه نیروی پسا، مقادیر متوسط نیروی پسا، متوسط بیشینه و کمینه حرکت هیو، متوسط حرکت هیو، متوسط بیشینه و کمینه زاویه پیچ و متوسط زاویه پیچ در سه نسبت طول موج آورده شده‌اند. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود با افزایش نسبت λ/L تا حدود سرعت ۶/۵ متر بر ثانیه (معادل عدد فرود حجمی ۳/۰۴) که شناور وارد فاز سرشی شده است، متوسط مقادیر نیروی پسآ کاهش می‌یابد. در سرعت ۸/۵۶ که شناور کاملاً در فاز سرشی است در ۲= λ/L متوسط نیروی پسآ وارد بر شناور کمی کمتر از دو λ/L دیگر می‌باشد. با توجه به شکل۱۱ مشاهده می‌شود که مقادیر متوسط حرکت هیو به یکدیگر نزدیک می‌باشند. کمترین مقادیر متوسط مربوط به کوچک‌ترین نسبت λ/L هستند. نکته جالب این است که تغییرات در فازهای جابجایی و سرشی کمتر از فاز نیمه جابجایی است.



شکل۱۰- تغییرات متوسط نیروی پسا با سرعت شناور در ۳ نسبت طول موج



شکل۱۱- تغییرات متوسط حرکت هیو با سرعت شناور در ۳ نسبت طول موج



شکل۱۲- تغییرات متوسط زاویه پیچ با سرعت شناور در ۳ نسبت طول موج

۴-۲-۳-بررسی اثر ارتفاع موج بر دریامانی شناور

در این بخش با در نظر گرفتن سه ارتفاع موج مختلف به بررسی اثر آن‌ها بر روی حرکت شناور در یک سرعت میانی در امواج پرداخته شده است. در جدول ۱۳ مشخصات حالات مختلف ارائه شده‌اند.

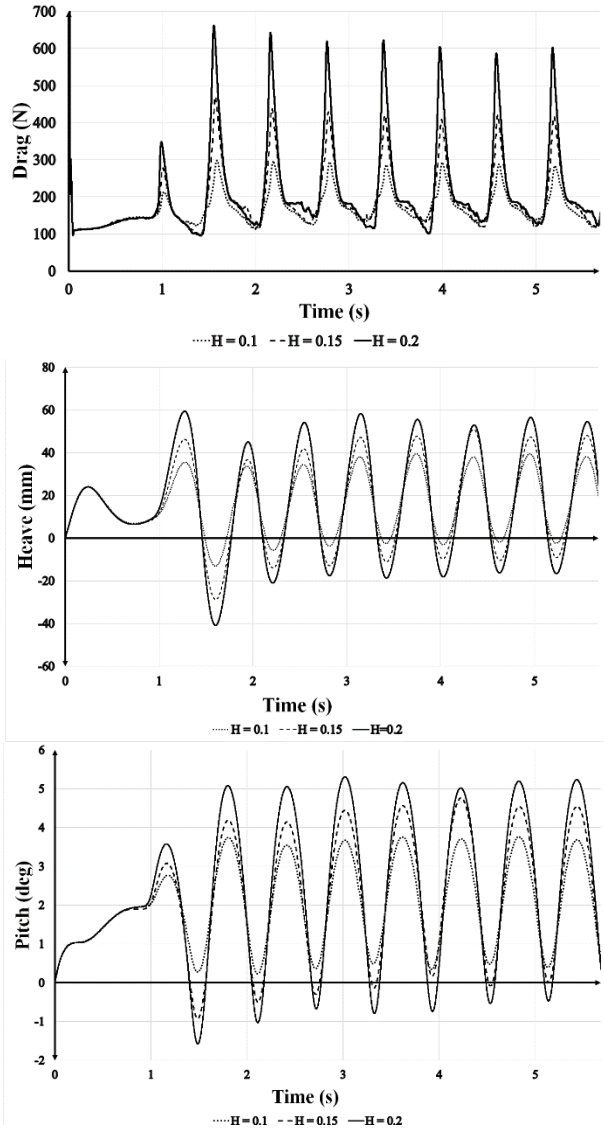
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]

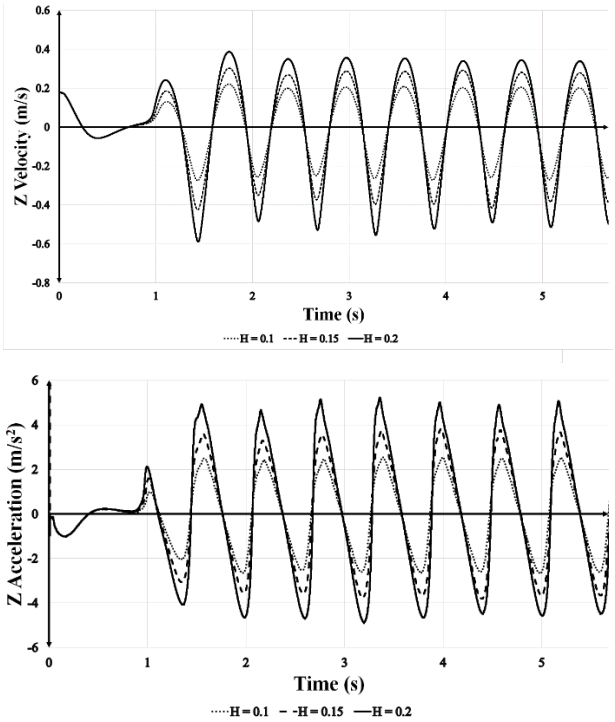
[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.9]

جدول۱۳- مشخصات مربوط به بررسی شناور در سه ارتفاع موج مختلف

سرعت (m/s)	شبکه مورد استفاده	زاویه برخورد موج (درجه)	λ/L	ارتفاع موج (متر)
۵/۳۳	۶۲۶K	۰	۲	۰/۱
۵/۳۳	۶۲۶K	۰	۲	۰/۱۵
۵/۳۳	۶۲۶K	۰	۲	۰/۲

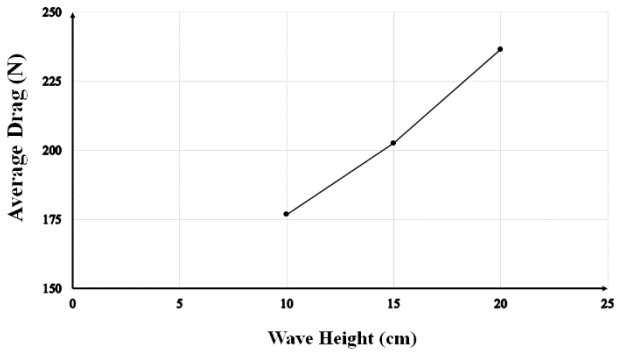
همانطور که مشاهده می شود، بررسی ارتفاع موج در یک سرعت، یک شبکه و یک نسبت λ/L انجام شده است. در شکل ۱۳ به ترتیب تاریخچه نیروی پسآ، حرکت هیو، پیچ، سرعت و شتاب در راستای عمود حاصل از سه ارتفاع مختلف موج ارائه شده‌اند.





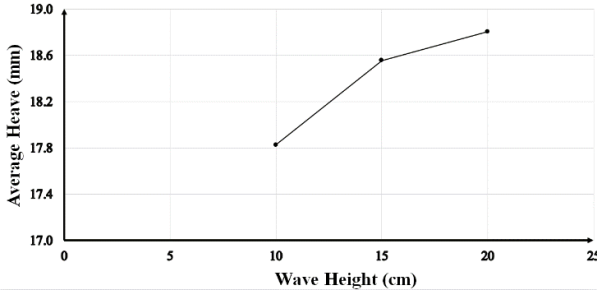
شکل ۱۳-تاریخچه پارامترهای مختلف شناور در سرعت ۵/۲۳ متر بر ثانیه در نسبت ارتفاع های مختلف موج

همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع موج مقدار متوسط نیروی پسآ افزایش یافته است. موج هرچقدر ارتفاع بیشتری داشته باشد، انرژی بیشتری نیز دارد و حرکت شناور در امواج با ارتفاع بالاتر مشکل‌تر خواهد بود. بر اساس شکل۱۵ مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع موج متوسط مقادیر حرکت هیو افزایش یافته است. در شکل ۱۶ روند افزایشی برای مقادیر متوسط بر اساس افزایش ارتفاع موج مشاهده می‌شود. شناور برای عبور از امواج با ارتفاع بیشتر تحت تاثیر زاویه پیچ بیشتری قرار می‌گیرد.

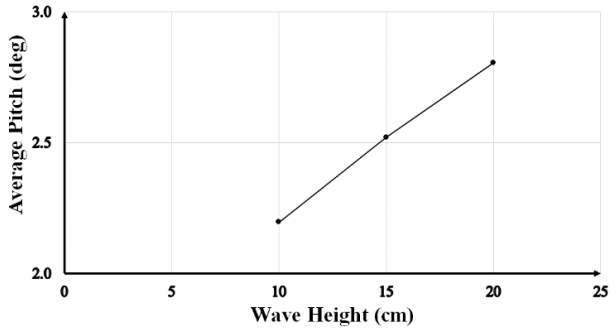


شکل۱۴- متوسط نیروی پسا با تغییرات ارتفاع موج در سرعت ۵/۲۳ متر بر ثانیه در λ/L = ۲

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]
[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.9]



شکل۱۵- متوسط حرکت هیو با تغییرات ارتفاع موج در سرعت ۵/۲۳ متر بر ثانیه در ۲ = λ/L

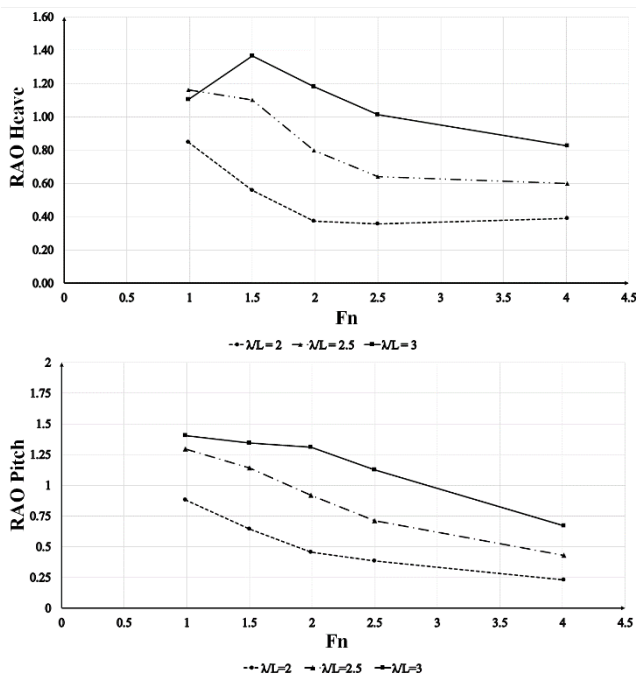


شکل۱۶- متوسط حرکت پیچ با تغییرات ارتفاع موج در سرعت ۵/۲۳ متر بر ثانیه در ۲ = λ/L

۴-۲-۴-بررسی دریامانی شناور با محاسبه عملگرهای پاسخ دامنه حرکات هیو و پیچ در شرایط مختلف

در این بخش با در نظر گرفتن عملگرهای پاسخ دامنه یا توابع انتقال مقادیر بی‌بعد شده دامنه حرکات هیو و پیچ محاسبه شده‌اند. جهت محاسبه دامنه حرکات هیو و پیچ به این ترتیب عمل شده است که با استفاده از تاریخچه این دو حرکت در بررسی حالت‌های مختلف و در قسمت پایدار شده حرکت، دامنه این دو حرکت محاسبه شده است و سپس با در اختیار داشتن اطلاعات موج از جمله دامنه موج و عدد موج و همچنین روابط (۷و۸)، مقادیر بی‌بعد شده دامنه این دو حرکت یا عملگر پاسخ دامنه آن‌ها محاسبه و ارائه شده‌اند.

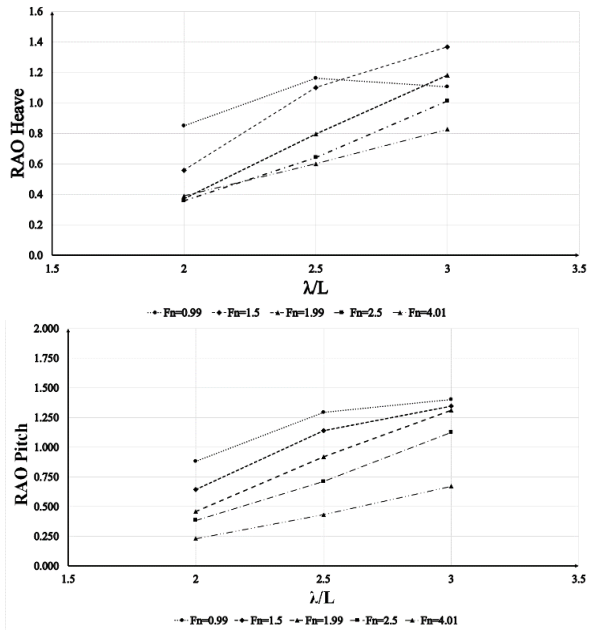
همانطور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، با افزایش عدد فرود مقادیر عملگر پاسخ دامنه حرکات هیو و پیچ در هر سه نسبت λ/L کاهش می یابند، البته در ۳ = λ/L مقدار عملگر پاسخ دامنه حرکت هیو با تغییر از فاز جابه‌جایی به فاز نیمه‌جابه‌جایی ابتدا افزایش یافته است و سپس در ادامه کاهش می‌یابد. از عدد فرود ۲/۵ تا ۴ که شناور به فاز سرشی می‌رسد، در دو نسبت λ/L پایین‌تر مقادیر عملگر پاسخ دامنه حرکت هیو تقریباً ثابت شده‌اند و همچنین مشاهده می‌شود که در هر دو حرکت هیو و پیچ با افزایش λ/L مقادیر عملگر پاسخ دامنه افزایش داشته‌اند. همچنین برای مشاهده بهتر تغییرات عملگر پاسخ دامنه این دو حرکت بر حسب تغییرات λ/L در اعداد فرود مختلف نیز ارائه شده‌اند.



شکل ۱۷- تغییرات عملگر پاسخ دامنه حرکت هیو و پیچ بر حسب فرود حجمی در سه نسبت λ/L

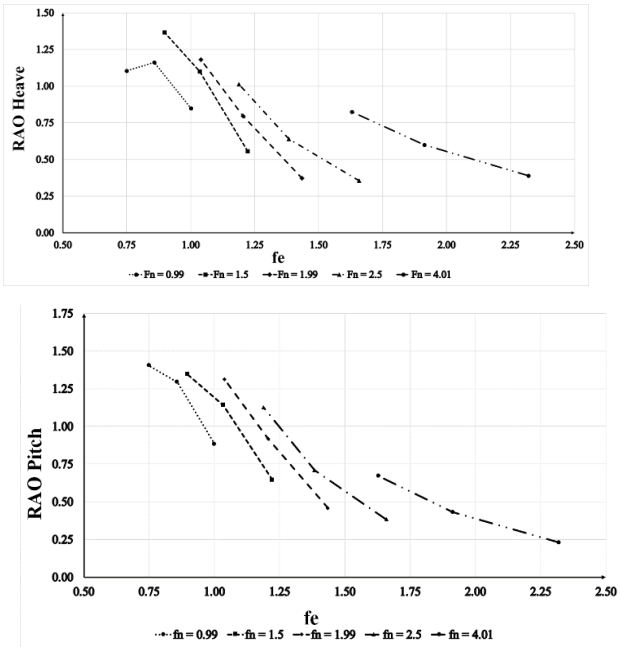
همانطور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت λ/L مقادیر عملگر پاسخ دامنه حرکات هیو و پیچ افزایش می یابند ولی مقدار عملگر پاسخ دامنه حرکت هیو در عدد فرود ۰/۹۹ که مربوط به فاز جابه‌جایی می‌باشد، در بیشترین نسبت λ/L کاهش یافته است یا به عبارتی در ۲/۵= λ/L بدترین شرایط دریامانی را داشته است اما در بقیه اعداد فرود با افزایش λ/L شرایط دریامانی بدتر شده است، در حالیکه نیروی پسآ وارد بر شناور کاهش می یابد و همچنین مشخص است که با افزایش سرعت شرایط دریامانی در تمام سرعت‌ها بهتر می‌شود. کمترین مقادیر عملگر پاسخ دامنه حرکات هیو و پیچ مربوط به فاز سرشی می‌باشند. در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس برخورد مقادیر عملگر پاسخ دامنه حرکات هیو و پیچ در اعداد فرود حجمی مختلف کاهش می‌یابند. البته در ۰/۹۹= F_n که شناور در فاز جابه‌جایی قرار دارد عملگر پاسخ دامنه حرکت هیو ابتدا کمی افزایش و سپس کاهش یافته است. در سرعت‌های بالاتر شناور شرایط دریامانی مناسب‌تری دارد ولی به نظر می‌آید که تمام منحنی‌ها می‌توانند در یک f_e (فرکانس برخورد) به یک مقدار بیشینه برسند که این امر نشان می‌دهد هرچه سرعت شناور بیشتر باشد، در نسبت‌های λ/L بالاتری می‌تواند به بدترین شرایط دریامانی برسد یا به عبارتی در موج‌هایی با طول موج بزرگ‌تر و یا دوره تناوب بزرگ‌تر شرایط بدتری را تجربه می‌کند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]
[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.9]

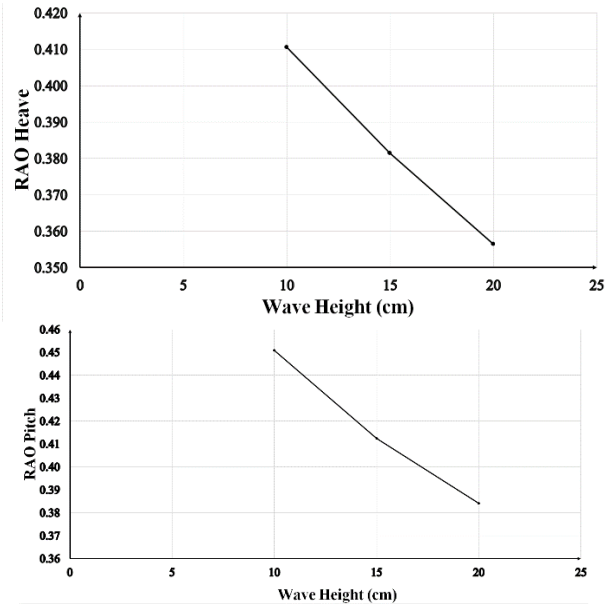


شکل ۱۸- تغییرات عملگر پاسخ دامنه حرکت هیو و پیچ بر حسب λ/L برای ۵ فرود حجمی مختلف

در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع موج مقادیر عملگر پاسخ دامنه کاهش می‌یابند. با توجه به شکل‌های ۱۵ و ۱۶ با افزایش ارتفاع موج در مقادیر دامنه حرکت هیو و پیچ افزایش مشاهده می‌شود ولی با توجه به شکل ۲۰ مشاهده می شود که با افزایش ارتفاع موج به همان نسبت به دامنه تغییرات این دو حرکت اضافه نمی‌شود، یعنی با دو برابر شدن ارتفاع موج لزوماً دامنه حرکت هیو و پیچ شناور دو برابر نمی‌شود.



شکل ۱۹-مقادیر عملگر پاسخ دامنه حرکت هیو و پیچ بر حسب فرکانس برخورد در اعداد فرود حجمی مختلف



شکل ۲۰-مقادیر عملگر پاسخ دامنه حرکت هیو و پیچ بر حسب ارتفاع موج در سرعت ۵/۳۳ و ۲ = λ/L

۵- جمع‌بندی

بررسی عملکرد شناورها در دریاهای مواج به دلیل تاثیری که امواج بر امنیت و سلامت خدمه، مسافرین، بار شناور و خود سازه شناور دارد از ملزومات اولیه در طراحی شناورها می‌باشد. برای بیان اهمیت این موضوع کافی است که به این مورد اشاره کرد که بسیاری از شناورها به دلیل عدم رعایت مسئله دریامانی قادر به انجام ماموریت خود نبوده‌اند. در نهایت هدف از بررسی دریامانی کاهش شرایط اعمال شونده بر روی شناورها در دریاهای مواج، مانند پدیده کوبش، خیسی عرشه، برخورد امواج از طرفین به شناور و از بین بردن پایداری آن و غیره می‌باشد که در جهت نائل شدن به این مهم، معمولاً حرکات در صفحه عمودی (حرکات هیو و پیچ) محاسبه و ارزیابی می‌شوند.

نتایج کلی به دست آمده از بررسی صورت گرفته در این تحقیق در ادامه ارائه شده‌اند:

با افزایش سرعت در نسبت ۲= λ/L و رسیدن به فاز سرشی مقادیر متوسط نیروی پسآ، مقادیر متوسط حرکت هیو و پیچ افزایش می‌یابند.

با افزایش سرعت در نسبت ۲/۵ = λ/L و رسیدن به فاز سرشی مقادیر متوسط نیروی پسآ افزایش، مقادیر متوسط حرکت هیو افزایش و مقادیر متوسط زاویه پیچ در ابتدای فاز نیمه جابجایی کمی کاهش و سپس افزایش می‌یابند.

با افزایش سرعت در نسبت ۳ = λ/L و رسیدن به فاز سرشی مقادیر متوسط نیروی پسآ افزایش، مقادیر متوسط حرکت هیو افزایش و

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]
[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.9]

مقادیر متوسط زاویه پیچ همانند نسبت قبلی در ابتدای فاز نیمه جابجایی کمی کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

با افزایش نسبت λ/L ابتدا در فاز جابجایی متوسط نیروی پسآ کاهش یافته است. در شروع فاز نیمه جابجایی متوسط نیروی پسآ ابتدا کمی افزایش و سپس در ادامه همین فاز کاهش یافته است. در فاز سرشی متوسط نیروی پسآ افزایش داشته است.

با افزایش ارتفاع موج مشاهده می‌شود که مقادیر متوسط نیروی پسآ، مقادیر متوسط حرکت هیو و پیچ نیز افزایش می‌یابند.

مقادیر عملگر پاسخ دامنه حرکت هیو و پیچ در هر سرعت با افزایش نسبت λ/L افزایش می‌یابند، البته در فاز جابه جایی در λ/L = ۳ کمی کاهش مشاهده می‌شود.

مقادیر عملگر پاسخ دامنه حرکت هیو و پیچ با افزایش ارتفاع موج کاهش می‌یابند.

مقادیر عملگر پاسخ دامنه حرکت هیو در سرعت‌ها یا اعداد فرود یکسان با افزایش فرکانس برخوردی کاهش می‌یابند، البته در F_n =۰/۹۹ که شناور در فاز جابه‌جایی قرار دارد عملگر پاسخ دامنه حرکت هیو ابتدا کمی افزایش و سپس کاهش یافته است. همچنین مقادیر عملگر پاسخ دامنه زاویه پیچ در سرعت‌ها یا اعداد فرود یکسان با افزایش فرکانس برخوردی کاهش می‌یابند.

۶- مراجع

1-Moonesun, M., 2012, *Handbook of naval architecture*, Research center publications, Tehran (In Persian)

2- Cakici, F., Yildiz, B. and Alkan, A. D., (2015), *Crew Comfort investigation for vertical and lateral responses of a container ship, International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*, Glasgow, UK

3- Tupper, E. C., (2004), *Introduction to Naval Architecture*, Oxford: Elsevier.

4-Clement, E.P., Blount, D.L., (1963), *Resistance Tests of a Systematic Series of Planing Hull Forms*, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, p.491-579.

5- Fridsma, G., (1969), *A Systematic Study of the Rough-Water Performance of Planing Boats*, Davidson Laboratory, Report 511-DL-71-1495

6- Savitsky, D., and Brown, P. W., (1976). *Procedures for Hydrodynamic Evaluation of Planing Hulls in Smooth and Rough Water*, Marine Technology, Vol. 13, p.381-400. DOI:10.5957/mtl.1976.13.4.381

7- Kukner, A., and Sarioz, A., (1995). *High speed hull form optimisation for seakeeping, Advanced in Engineering Software*, Vol. 22. p.179-189. https://doi.org/10.1016/0965-9978(95)00016-P

8- Khosravi Babadi, M., and Ghassemi, H., (2013), *Effect of hull form coefficients on the vessel seakeeping Performance*, Marine Science and Technology, Vol.21, p.594-604. DOI:10.6119/JMST-013-0117-2

9- Kim, D. J., Kim, S. Y., You, Y. J., Rhee, K. P., Kim, S. H., and Kim, Y. G., (2013). *Design of High-Speed Planing Hulls for The Improvement of Resistance and Seakeeping Performance*, Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 5, p.161-177. https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0124

10- Ma, W., Hanbing Sun, D., Jin Zou, D., and Zhuang J., (2015), *Test Studies of the Resistance and Seakeeping Performance of a Trimaran Planing Hull*, Polish, Maritime Research, Vol. 22, p.22-27. DOI:10.1515/pomr-2015-0004

11- De Marco, A., Mancini, S., Miranda, S., Scognarniglio, R., and Vitiello, L., (2017), *Experimental and Numerical Hydrodynamic Analysis of a Stepped Planing Hull, Applied Ocean Research*, Vol.64, p.135- 154. https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.02.004

12- Cucinotta, F., Guglielmino, E., and Sfravara, F., (2017), *An Experimental Comparison between Different Artificial Air Cavity Designs for a Planing Hull*, Ocean Engineering, Vol. 140, p.233-243. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.05.028

l3- Pirayesh, S., Nikseresht, A.H., and Zainali,H., (2011), *Experimental investigation of added resistance on NACA 4667-1 planing Hull in head sea waves*, MIC2017, Kish Island, (In Persian)

14- Yao, C.B., Sun, X. S., Wang, W., and Ye. Q., (2017). *Seakeeping Performance of Ship in Finite Water Depth*, Applied Ocean Research, Vol.67, p.59-77.

l5- Jiao, J., Sun, S., Li, j., Adenya, C. A., Ren, H., Chen, C., and Wang, D., (2018), *A Comprehensive Study on the Seakeeping Performance of High speed Hybrid Ships by 2.5D Theoretical Calculation and Different Scaled Model Experiments*, Ocean Engineering, Vol. 60, p.197-223. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.051

16- Faltinsen, O. M., and Sun, H., (2007), *The Influence of Gravity on the Performance of Planing Vessels in Calm Water*, Engineering Mathematics, Vol. 58, p.91-107. https://doi.org/10.1007/s10665-006-9107-5

17-Ozum, S., Sener, B., and Yilmaz, H., (2011), *A Parametric Study On Seakeeping Assessment of Fast Ships in Conceptual Design Stage*, Ocean Engineering, Vol. 38, p.1439-1447. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.07.005

18- Castiglione, T., Stern, F., Bova, S., and Kandasamy, M., (2011), *Numerical Investigation of the Seakeeping Behavior of a Catamaran Advancing in Regular Head Waves*, Ocean Engineering, Vol. 38, p.1806-1822. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.09.003

19- Wang, S., Su, Y., Zhang, X., and, Yang, J., (2012), *RANSE Simulation of High-speed Planing Craft in Regular Waves*, Marine Science Application, Vol. 11, p.447-452. https://doi.org/10.1007/s11804-012-1154-x

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.9]

20- Shen, Z., and Wan, D., (2013), *RANS Computations of Added Resistance and Motions of a Ship in Head Waves*, Offshore and Polar Engineering, Vol.23, p.263-271. ISOPE-13-23-4-263

2l- Mousaviraad, S.M., Wang, Z., and Stern, F., (2015), *URANS Studies of Hydrodynamic Performance and Slamming Loads on high-speed Planing Hulls in Calm Water and Waves for Deep and Shallow Conditions*, Applied Ocean Research, Vol. 51, P.222-240. https://doi.org/10.1016/j.apor.2015.04.007

22- Kim, M., Hizir, O., Turan, O., and Incecik, A., (2017), *Numerical Studies On Added Resistance and Motions of KVLCC2 in Head Seas for Various Ship Speeds*, Ocean Engineering, Vol.140, p.466-476. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.06.019

23- Masumi, Y., and Nikseresht, A.H., (2017), *Comparison of Numerical Solution and Semi-Empirical Formulas to Predict the Effects of Important Design Parameters on Porpoising Region of a Planing Vessel*, Applied Ocean Research, Vol. 68, p.228-236. https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.09.002

24- Taghva, H.R., Ghassemi, H., and Nowruzi, H., (20 18), *Seakeeping Performance Estimation of Container Ship under Irregular Wave Condition Using Artificial Neural Network*, Civil Engineering and Architecture, Vol.6, p.147 -153. DOI: 10.12691/ajcea-6-4-3

25- Safari, A., and Nikseresht, A.H., (2018*), Numerical investigation of added resistance and wave pattern on a Planing Vessel in Regular head Waves*, International Journal of Engineering System and Modeling and Simulation, Vol. 10, No.3, p.169-178. https://doi.org/10.1504/IJESMS.2018.094085

26- Masumi, Y., and Nikseresht, A.H., (2019), *2DOF numerical investigation of a planing vessel in head sea waves in deep and shallow water conditions*. Applied Ocean Research, Vol. 82, p.41-51. https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.10.017

27-Xiaosheng, Bi, Jiayuan, Zh., and Yumin, Su, (2020), *Seakeeping Analysis of Planing Craft under Large Wave Height*,Water, 12 (4), https://doi.org/10.3390/w12041020

28- Salvatore. C., Bonaventura. T., Simone. M., Iván. M.E., Corrado. A., José. M.D., and Giacomo. V., (2023), *Regular Wave Seakeeping Analysis of a Planing Hull by Smoothed Particle Hydrodynamics: A Comprehensive Validation*, J. Mar. Sci. Eng., 11(4), https://doi.org/10.3390/jmse11040700

29- Seol, N., Jong-Chun, P., Jun-Bum, P., and Hyeon, K.Y., (2024*), Numerical Simulation of Seakeeping Performance of a Barge Using Computational Fluid Dynamics (CFD)-Modified Potential (CMP) Model*, J. Mar. Sci. Eng., 12(3), https://doi.org/10.3390/jmse12030369

30- Khosravi Babadi, M., and Ghasemi, H., (2024), *Optimization of ship hull forms by changing CM and CB coefficients to obtain optimal seakeeping performance*, Plos one 19, e0302054. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0302054

31- Perez, T., (2006), *Ship Motion Control: Course Keeping and Roll Stabilisation Using Rudder and Fins*, Springer, London.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-07]

[DOI: 10.61882/marineeng.21.46.9]